

Gleiss & Große

Patentanwälte · Rechtsanwälte
European Patent Attorneys
European Trademark Attorneys

Intellectual Property Law
Technology Law

Leitzstraße 45
D-70469 Stuttgart
Telefon: +49 (0)711 99 3 11-0
Telefax: +49 (0)711 99 3 11-200
E-Mail: office@gleiss-grosse.com
Homepage: www.gleiss-grosse.com

In cooperation with
Shanghai Zhi Xin Patent Agency Ltd.
Shanghai · China

Dr. jur. Alf-Olav Gleiss · Dipl.-Ing. · PA
Rainer Große · Dipl.-Ing. · PA
Dr. Andreas Schrell · Dipl.-Biol. · PA
Torsten Armin Krüger · RA
Nils Heide · RA
Armin Eugen Stockinger · RA

PA: Patentanwalt · European Patent Attorney
European Trademark Attorney

RA: Rechtsanwalt · Attorney-at-law · Admitted for
Representation at the EU-Trademark Office (OHIM), Alicante

Patentanmeldung

Verfahren und Vorrichtung zur optischen Formvermessung und/oder Beurteilung

**OBE Ohnmacht & Baumgärtner
GmbH & Co. KG
Turnstrasse 22**

**75228 ISPRINGEN
DE**

Verfahren und Vorrichtung zur optischen Formvermessung und/oder Beurteilung

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur optischen Formerfassung und/oder Beurteilung von Gegenständen und Oberflächen, insbesondere glänzenden Oberflächen. Mit dem Begriff glänzend werden im Weiteren Gegenstände bezeichnet, deren optische Rauigkeit im Übergangsbereich zwischen optisch rauen und optisch glatten Oberflächen liegt. Optisch raue Oberflächen sind dadurch definiert, dass sie eine Rauigkeit besitzen, die wesentlich höher ist als die Wellenlänge von sichtbarem Licht (etwa 0,5 Mikrometer), während optisch glatte Oberflächen eine Rauigkeit weit unter der Wellenlänge aufweisen. Aufgrund dieser Eigenschaft zeigen optisch raue Oberflächen eine ungerichtete, diffuse Reflexion bzw. Transmission von Licht. Beispiele hierfür sind Papier, Kreide, Mattscheiben etc. Optisch glatte Oberflächen dagegen spiegeln bzw. transmittieren einfallendes Licht gerichtet. Sie sind in der Lage, ein optisches Abbild ihrer Umgebung zu erzeugen. Als Beispiele sind ebene oder gewölbte Spiegel und polierte Metall- und Glasoberflächen (Linsen) zu nennen.

Im Übergangsbereich zwischen diesen beiden Extremen liegen die als glänzend bezeichneten Gegenstände. Diese Gegenstände sind von hoher Bedeutung, da sie sehr häufig anzutreffen sind. Insbesondere industriell hergestellte Gegenstände aus Metall, Kunststoff, aber auch Holz und andere Materialien gehören zu den glänzenden Gegenständen. Die industrielle Bearbeitung solcher Materialien (spanende Bearbeitung von Metall und Holz, Spritzgießen von

Kunststoff, Pulverspritzguss von Metall und Keramik etc.) erzeugt Rauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer, also in der Größenordnung der Wellenlänge von sichtbarem Licht (um 0,5 Mikrometer).

5 Für diffus streuende, optisch raue Oberflächen gibt es eine breite Palette von optischen 3D-Sensoren. Eines der am weitesten verbreiteten Verfahren beruht auf der Projektion von Streifenmustern. Die Muster werden aus einer Richtung projiziert und aus einer anderen mit einer Kamera beobachtet. Die Streifen scheinen für die Kamera, je nach Form des beobachteten Gegenstandes, mehr oder weniger
10 deformiert. Aus der Deformation der Streifen kann auf die Form des Gegenstandes zurückgeschlossen werden. In der Regel werden mehr als drei Streifenmuster projiziert, wobei die Intensität der Streifen einen sinusförmigen Verlauf annimmt.

15 Aus der Vielzahl der übrigen Verfahren sollen die Verfahren der Gruppe „Shape from Shading“ erwähnt werden, insbesondere das photometrische Stereoverfahren, da die Erfindung auf ihnen aufbaut. Diese Verfahren schließen aus der Helligkeitsstruktur einer Objekt-oberfläche auf dessen Form. Eine detaillierte Beschreibung erscheint nachfolgend.

20 Auch für optisch glatte Oberflächen sind Verfahren bekannt, die eine dreidimensionale Vermessung ermöglichen. Zum Test von einfachen Oberflächenformen, wie ebenen oder sphärischen Flächen (Linsen, Spiegel etc.), kommen vorwiegend interferometrische Verfahren zum Einsatz. Bei komplizierter geformten Flächen wie Asphären kommen
25 das Hartmann-Verfahren und der Shack-Hartmann-Test zum Einsatz. Hier beobachtet man die Ablenkung eines dünnen Strahlenbündels durch den zu vermessenden Gegenstand. Andere Verfahren

beobachten ein Gittermuster, welches an der Gegenstandsoberfläche reflektiert bzw. transmittiert wird. Je nach deren Form erscheint das Gitter mehr oder weniger deformiert. Diese Verfahren lassen sich unter dem Stichpunkt der deflektometrischen Verfahren zusammenfassen. Ihnen ist gemeinsam, dass sie die Strahlablenkung bestimmen und daraus auf die Form der Oberfläche schließen. Die deflektometrischen Verfahren beruhen auf dem Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz, das den Zusammenhang zwischen einfallendem Strahl, Oberflächennormale und dem reflektierten bzw. transmittierten Strahl beschreibt.

Die Vermessung von Oberflächen im Übergangsbereich zwischen den optisch rauen und optisch glatten Oberflächen ist allerdings bislang noch nicht gelöst. Die Verfahren der einen, als auch der anderen Kategorie versagen für diesen Fall. Man kann zwar mit einem Sensor für raue Oberflächen mit gelegentlich vorkommenden Glanzstellen zurechtkommen, dominiert aber Glanz über diffuser Streuung, so ist ein solcher Sensor ungeeignet. Auf der anderen Seite wird ein Sensor für optisch glatte Oberflächen, insbesondere ein deflektometrischer Sensor, Mühe haben, wenn die Oberfläche zu rau ist, um eine klare optische Abbildung zu ermöglichen. Es muss beispielsweise sichergestellt sein, dass die feine Struktur des Gitters noch sichtbar ist. Geringere Anforderungen an die Qualität der Oberfläche stellt das Verfahren mit Sinusstreifen, da sinusförmige Streifen ein höheres Maß an Unschärfe erlauben. Doch auch hier muss sichergestellt sein, dass die Struktur der Streifen immer noch sichtbar ist.

Die bekannten optischen Sensoren liefern also gerade bei glänzenden Oberflächen aus dem Übergangsbereich, die sehr häufig bei

industriell gefertigten Produkten vorkommen, keine zufrieden stellenden Ergebnisse.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zu schaffen, die diesen Nachteil vermeiden.

- 5 Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen nach Anspruch 1 gelöst. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass zwei an sich bekannte Verfahren, die sich auf den ersten Blick gegenseitig auszuschließen scheinen, mit Hilfe eines besonders geformten optischen Elementes, insbesondere eines Streukörpers, kombiniert werden.
- 10 Es handelt sich zum Einen um ein an sich bekanntes photometrisches Stereoverfahren. Dieses Verfahren kommt an diffus reflektierenden Oberflächen zum Einsatz, versagt aber bei glänzenden Oberflächen. Zum Anderen handelt es sich um ein deflektometrisches Verfahren für reflektierende bzw. transmittierende Oberflächen. Die
- 15 Anwendungsbereiche beider Verfahren werden durch das optische Element derart erweitert, dass das resultierende Gesamtverfahren besonders gute Ergebnisse bei glänzenden Oberflächen liefert.

- Diese Aufgabe wird außerdem durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen nach Anspruch 12 gelöst. Diese zeichnet sich durch einen Streukörper aus. Dieser ermöglicht es, die Anwendungsbereiche verschiedener Verfahren zur optischen Formerfassung derart zu erweitern, dass sich bisher an einem Körper ausschließende Verfahren, insbesondere die Verfahren der Deflektometrie und des photometrischen Stereos, vorteilhaft zu einem neuen Verfahren, vorzugsweise für Körper mit glänzenden Oberflächen, kombiniert werden können.
- 20
- 25

Bevorzugt wird ein Ausführungsbeispiel der Vorrichtung, das sich dadurch auszeichnet, dass der Streukörper zumindest teilweise kugelförmig, ellipsoidförmig und/oder rotationssymmetrisch aufgebaut ist. Dies bietet den Vorteil, dass die sich bei Beleuchtung des Streukörpers von diesem ausgehende Strahlung besonders einfach anhand bekannter mathematischer Zusammenhänge zur Formerfassung eines Gegenstandes ausnutzen lässt.

Schließlich wird ein Ausführungsbeispiel bevorzugt, das sich dadurch auszeichnet, dass zur optischen Abbildung ein Mikroskop und/oder Mikroskopobjektiv verwendet wird. Dies ermöglicht die Formerfassung von besonders kleinen Gegenständen.

Weitere vorteilhafte Ausführungsformen des Verfahrens beziehungsweise Ausgestaltungen der Vorrichtung ergeben sich aus den übrigen Unteransprüchen.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand einer Darstellung der erfindungsgemäß kombinierten Verfahren und einer Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 eine bekannte Vorrichtung zur Durchführung eines photometrischen Stereoverfahrens;
- Figur 2 eine teilweise Darstellung einer bekannten Vorrichtung zur Durchführung eines deflektometrischen Verfahrens und
- Figur 3 eine schematisierte Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Vorrichtung zur Durchführung des erfin-

dungsgemäßen Verfahrens zur optischen Formerfassung.

- Das photometrische Stereoverfahren gehört zu einer größeren Gruppe von Verfahren, die unter dem Namen „Shape from Shading“ bekannt sind. Bei diesen Verfahren geht es darum, aus der Variation der Helligkeit in einem Bild auf die Form des abgebildeten Objektes zu schließen. Betrachtet man beispielsweise die Fotografie eines Gesichtes, so stellt man Helligkeitsschwankungen fest, obwohl man annehmen kann, dass sich der Reflexionskoeffizient der Haut kaum ändert. Vielmehr entstehen diese Schwankungen dadurch, dass bestimmte Teile der Oberfläche so orientiert sind, dass sie mehr Licht zur Kamera strahlen als andere. Fällt das Licht einer Quelle senkrecht auf die Oberfläche, so ist die Helligkeit maximal, bei streifendem Einfall ist sie minimal. Ein anschauliches Beispiel bietet auch die Beleuchtung der Erdoberfläche durch die Sonne. Zur Mittagszeit im Sommer scheint die Sonne nahezu senkrecht auf die Erdoberfläche, was große Helligkeit bewirkt. Bei Sonnenuntergang streift das Licht gerade die Oberfläche und man hat geringe Helligkeit. Bei Shape from Shading gibt es unterschiedliche Fragestellungen.
- Eine Gruppe von Verfahren beschäftigt sich damit, die Form einer als untexturiert (überall gleicher Reflexionskoeffizient) angenommenen Oberfläche zu ermitteln. Andere Verfahren bestimmen neben der Form des Objektes auch die Position der Lichtquelle (Source from Shading). Beim photometrischen Stereoverfahren wiederum ist die Position der Lichtquellen a priori bekannt und Objekttextur ist zugelassen. Dies ist im Blick auf einen vielseitig verwendbaren Sensor besonders interessant, denn in der Praxis ist die Textur meist

nicht bekannt. Im Weiteren geht es deshalb um ein photometrisches Stereoverfahren.

Das mittels einer Vorrichtung gemäß Figur 1 durchführbare Verfahren des photometrischen Stereo soll hier wiedergegeben werden.

- 5 Man geht davon aus, dass ein zu vermessender Gegenstand G mit der dreidimensionalen Form $z(x, y)$ nacheinander von drei punktförmigen Lichtquellen 1, 2, 3 beleuchtet wird. In Figur 1 ist die Oberfläche O des Gegenstands G durch eine Linie angedeutet. Im einfachsten Fall kann man annehmen, dass sich die Lichtquellen in großer
- 10 Entfernung befinden und so die Beleuchtungsrichtung über dem Gegenstand G für jede Quelle konstant bleibt. Besonders einfache Verhältnisse liegen vor, wenn die Oberfläche O als Lambert-Streuer (ideale ungerichtete Streuung) dargestellt werden kann. Beim Lambert-Streuer hängt die gestreute Intensität des Gegenstands G nur
- 15 von der Beleuchtungsrichtung und der Neigung des Gegenstands G, nicht aber von der Beobachtungsrichtung ab. Für jede der drei Lichtquellen 1, 2, 3 nimmt eine Kamera K ein eigenes Bild auf. Die Position des Gegenstandes G und der Kamera K bleibt dabei fest.

- Zur mathematischen Darstellung des photometrischen Stereoverfahrens benötigt man die drei Beleuchtungsrichtungen und den Normalenvektor $\bar{n}(x, y)$ der auch als Objektoberfläche bezeichneten Oberfläche O des Gegenstands G. Die Beleuchtungsrichtungen werden
- 20 durch die Vektoren \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 beschrieben. Sie weisen von der Objektoberfläche zur jeweiligen Lichtquelle.

$$\begin{aligned} \bar{s}_1 &= (s_{11}, s_{12}, s_{13})^T \\ 25 \quad \bar{s}_2 &= (s_{21}, s_{22}, s_{23})^T \\ \bar{s}_3 &= (s_{31}, s_{32}, s_{33})^T \end{aligned}$$

Da sich die Lichtquellen in großer Entfernung befinden, bleiben diese Vektoren für alle Punkte der Oberfläche O näherungsweise konstant. Der Normalenvektor $\vec{n}(x, y)$ dagegen variiert entsprechend der Form der Oberfläche O und ist als lokaler Normalenvektor zu verstehen.

5
$$\vec{n}(x, y) = (n_x(x, y), n_y(x, y), n_z(x, y))^T$$

Es wird angenommen, dass die Oberfläche $z(x, y)$ differenzierbar ist und der Normalenvektor überall existiert. Für den Fall, dass $z(x, y)$ aufgrund von Kanten oder Sprüngen nicht differenzierbar ist, kann man die Oberfläche in differenzierbare Abschnitte aufteilen. Die Kamera K nimmt die Bilder $E_1(x, y)$, $E_2(x, y)$ und $E_3(x, y)$ des Gegenstands G auf, jeweils ein Bild mit Lichtquelle 1, 2 und 3. Die Kamera K befindet sich in großer Entfernung in Richtung der z-Achse, und jedes Bildelement nimmt die einfallende Beleuchtungsstärke $E_i(x, y)$ mit $i = 1, 2, 3$ auf, die den Koordinaten (x, y) der Oberfläche O zugeordnet werden kann. Nach dem Lambert'schen Gesetz variiert die gestreute Leuchtdichte mit dem Kosinus zwischen der Beleuchtungsrichtung \vec{s}_i und dem Normalenvektor $\vec{n}(x, y)$. Alternativ kann man die gestreute Leuchtdichte auch über das Skalarprodukt von Beleuchtungsrichtung und Normalenrichtung ausdrücken. Diese Darstellung hat den Vorteil, dass die Zusammenhänge linear dargestellt werden können. Neben der Neigung der Oberfläche O und der Beleuchtungsrichtung hängt die gestreute Leuchtdichte auch vom lokalen Reflexionskoeffizienten $\rho(x, y)$ der Oberfläche O (Textur) und der Beleuchtungsstärke der Lichtquellen und den Parametern der Kameraoptik ab. Alle konstanten Faktoren wie die Beleuchtungsstärke der Lichtquellen und die Parameter der Kameraoptik werden in der Län-

ge des Beleuchtungsvektors zusammengefasst. Damit kann man schreiben

$$E_1 = \rho \cdot \bar{s}_1 \cdot \bar{n}$$

$$E_2 = \rho \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{n}$$

$$E_3 = \rho \cdot \bar{s}_3 \cdot \bar{n}$$

5 Diese drei Gleichungen kann man zu einer einzigen in Matrix-schreibweise zusammenfassen, wenn man folgende Schreibweise für die Bilder einführt.

$$\bar{E} = (E_1, E_2, E_3)^T$$

Die Beleuchtungsvektoren bilden die Zeilen der Beleuchtungsmatrix

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix}$$

10 Damit kann man schreiben

$$\bar{E} = \rho \cdot S \cdot \bar{n}$$

Aufgelöst nach \bar{n} bzw. ρ erhält man

$$\bar{n} = \frac{1}{\rho} \cdot S^{-1} \cdot \bar{E}$$

mit

15 $\rho = \|S^{-1} \cdot \bar{E}\|$

Die Beleuchtungsmatrix S lässt sich immer dann invertieren, wenn die Beleuchtungsvektoren linear unabhängig sind, sprich wenn der Gegenstand G und die drei Lichtquellen 1, 2, 3 nicht in einer Ebene liegen.

- 5 Diese mathematische Beschreibung des photometrischen Stereoverfahrens mit Hilfe von Vektoren bietet den Vorteil gegenüber anderen Beschreibungen (beispielsweise die Beschreibungen mit Hilfe von Winkeln), dass ein linearer Zusammenhang zwischen Normalenrichtung, den Beleuchtungsrichtungen und den Beleuchtungsstärken E_1 ,
10 E_2 und E_3 hergestellt wird. Dieser lineare Zusammenhang kann mathematisch einfach nach der gesuchten Größe, der Normalenrichtung, aufgelöst werden: es muss lediglich die Beleuchtungsmatrix invertiert werden. Damit sind auch dreidimensionale Beleuchtungsanordnungen, bei denen die Normalenrichtung und die verschiedenen Beleuchtungsrichtungen nicht in einer Ebene liegen, mathematisch gut handhabbar, was für andere Beschreibungen (beispielsweise die Beschreibungen mit Hilfe von Winkeln) nicht möglich ist. Dies ist im weiteren von großer Bedeutung für das erfindungsgemäße Verfahren, da es ebenfalls auf einer vektoriellen Beschreibung basiert und somit dreidimensionale Beleuchtungsanordnungen berücksichtigen und dreidimensionale Objekte vermessen kann. Ist der Normalenvektor ermittelt, lässt sich die Form der Objektoberfläche $z(x, y)$ problemlos mit Hilfe der partiellen Ableitungen p und q nach x und y darstellen. Dies ist vorteilhaft für die spätere Integration der
25 Form $z(x, y)$.

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{n_x}{n_z}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{n_y}{n_z}$$

- 5 Diese Beschreibung des photometrischen Stereo gilt für Lambert-sche Oberflächen und weit entfernte Lichtquellen. Dieser Spezialfall wurde gewählt, um die Funktion des Verfahrens möglichst einfach darstellen zu können. Für Lichtquellen in endlicher Entfernung und Oberflächen, die nicht dem Lambert-Gesetz gehorchen, ist es möglich, das Verfahren anzupassen, was hier allerdings nicht weiter verfolgt werden soll.

- 10 Bislang liegen die Formdaten der Oberfläche O als Normalenvektor $\vec{n}(x, y)$ bzw. als partielle Ableitungen (hier auch als lokale Neigung bezeichnet)

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{n_x}{n_z}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{n_y}{n_z}$$

vor. Um die Form $z(x, y)$ zu gewinnen, müssen die partiellen Ableitungen aufintegriert werden.

- 15 Neben dem photometrischen Stereoverfahren greift die Erfindung zurück auf die Deflektometrie. Den deflektometrischen Verfahren ist gemeinsam, dass sie die Ablenkung eines Strahls an einer reflektierenden bzw. transmittierenden Oberfläche bestimmen und daraus auf deren Form schließen. Sie beruhen auf dem Reflexionsgesetz
20 bzw. Brechungsgesetz, das den Zusammenhang zwischen einfallen-

dem Strahl, der Oberflächennormalen und dem reflektierten Strahl beschreibt (siehe Figur 2). Figur 2 zeigt eine Vorrichtung mit einer Kamera K, die auf einen von einer Lichtquelle L beleuchteten Gegenstand G gerichtet ist, um dessen Oberfläche O zu erfassen. Im
5 Fall der Reflexion liegen einfallender Strahl E, reflektierter Strahl R und Oberflächennormale \vec{m} in einer Ebene. Der Winkel zwischen einfallendem Strahl und Oberflächennormale bzw. reflektiertem Strahl und Oberflächennormale ist gleich groß. Kennzeichnet man den einfallenden Strahl E durch den Einheitsvektor von der Oberfläche O in Richtung der Lichtquelle L und den reflektierten Strahl R analog durch den Einheitsvektor von der Oberfläche O in Richtung der
10 Beobachtung \vec{b} , so kann man eine einfache Beschreibung gewinnen. Der Normalenvektor \vec{m} bildet dann die (auf die Länge Eins normierte) Summe aus dem Vektor des einfallenden Strahls E und
15 des reflektierten Strahls R.

Deflektometrische Verfahren werden bisher für optisch glatte Oberflächen verwendet. Das photometrische Stereoverfahren und das Verfahren der Deflektometrie scheinen sich auf den ersten Blick gegenseitig zu widersprechen, da die zu vermessende Oberfläche nicht
20 gleichzeitig optisch rau und optisch glatt sein kann. Fügt man allerdings ein geeignetes optisches Element ein, so lassen sich die beiden Verfahren vorteilhaft kombinieren. Die Kombination beider Verfahren wird im Folgenden als "photometrische Deflektometrie" bezeichnet. Bei diesem optischen Element handelt es sich um einen
25 geeignet geformten, vorzugsweise halbkugelförmigen, insbesondere zumindest teilweise rotationssymmetrisch aufgebauten, durchscheinenden Streukörper. Der deflektometrische Anteil des Verfahrens findet sein Gegenüber in der glänzenden Oberfläche des Prüflings, der photometrische im Streukörper. In der beschriebenen Kombination

der Verfahren ist es möglich, stark glänzende Oberflächen zu vermessen.

Eine Vorrichtung zur photometrischen Deflektometrie in Reflexion ist in Figur 3 dargestellt und vorzugsweise wie folgt aufgebaut: Eine Kamera K ist auf einen glänzenden auch als Prüfling bezeichneten Gegenstand G ausgerichtet. Dessen Oberfläche O reflektiert Licht, das von einem vorzugsweise halbkugelförmigen Streukörper S ausgeht in Richtung der Kamera K. Soll das Verfahren statt in Reflexion in Transmission verwendet werden, muss die Kamera K in entgegengesetzter Richtung, hier von unten, auf den Gegenstand G ausgerichtet werden. Wegen seiner Rauigkeit erzeugt der Gegenstand G kein klares, sondern ein mehr oder weniger verschwommenes Abbild des Streukörpers S. Das verschwommene Bild stellt kein Hindernis für das Verfahren dar, wie es sonst bei deflektometrischen Verfahren der Fall ist. Hierauf wird im Weiteren noch eingegangen. Der Streukörper S wird seinerseits von mehreren Lichtquellen 1, 2, 3,... (vorzugsweise drei) beleuchtet, wie es für photometrische Verfahren üblich ist. Die zugehörigen Beleuchtungsvektoren von einem beispielhaft gewählten Punkt P des Streukörpers S zu den Lichtquellen sind \vec{s}_1 , \vec{s}_2 und \vec{s}_3 . Vorzugsweise liegen Gegenstand G und Lichtquellen 1, 2, 3 nicht in einer gemeinsamen Ebene, sondern sind räumlich, in drei Dimensionen angeordnet.

Vorzugsweise ist zunächst die Lichtquelle 1 eingeschaltet, die anderen sind abgeschaltet und die Kamera K nimmt ein Bild 4a des Gegenstands G unter dieser Beleuchtungssituation auf. Dieser Ablauf wiederholt sich, nachdem die Lichtquelle 2 angeschaltet und die anderen Lichtquellen abgeschaltet sind, ebenso für Lichtquelle 3 usw. Hierbei werden Bilder 4b, 4c usw. aufgenommen. Wahlweise können

die Lichtquellen auch in einer anderen Reihenfolge eingeschaltet werden. Ebenso können Lichtquellen gemeinsam eingeschaltet sein, z. B. Lichtquelle 1 und 2, dann Lichtquelle 2 und 3, sowie schließlich Lichtquelle 3 und 1. Ebenso sind Anordnungen mit mehr oder weniger als drei Lichtquellen möglich.

An die Aufnahme schließt sich die Auswertung der Bilder 4a, 4b, 4c entsprechend des photometrischen Stereoverfahrens an. Wie oben beschrieben, kann man aus der Lage der Lichtquellen 1, 2, 3 und den Grauwerten der Bildpunkte der Bilder 4a, 4b, 4c auf den Normalenvektor $\vec{n}(x, y)$ beziehungsweise die Neigung des Streukörpers S schließen.

$$\vec{n} = \frac{1}{\rho} \cdot S^{-1} \cdot \vec{E}$$

mit

$$\rho = \|S^{-1} \cdot \vec{E}\|$$

Beim gewöhnlichen photometrischen Stereoverfahren ist dies die Oberflächennormale des Gegenstandes G, bei der photometrischen Deflektometrie aber die Normale des Streukörpers S. Hierin liegt eine ganz wesentliche Neuerung: Das photometrische Stereoverfahren wird dazu eingesetzt, jeden Ort auf der der Streukörperoberfläche eindeutig zu codieren. Die Codierung kann gedanklich in verschiedene Schritte unterteilt werden:

- Die Form des Streukörpers ist so gewählt, dass jeder Ort auf der Streukörperoberfläche einen Normalenvektor \vec{n} besitzt, der nur einmal vorkommt. Vorzugsweise ist dies eine Kugel, eine El-

lipsoid, ein rotationssymmetrischer Körper oder Teile hiervon. Umgekehrt gibt es zu jedem Normalenvektor nur einen Ort auf dem Streukörper. Es liegt also eine eindeutige Zuordnung vor.

- Weiterhin werden durch das photometrische Stereoverfahren je-
5 dem Normalenvektor \vec{n} der Streukörperoberfläche die rückge-
streuten Leuchtdichten zugeordnet und umgekehrt.
- Die rückgestreuten Leuchtdichten am Streukörper sind wiederum
über die Reflexion an der Gegenstandsoberfläche eindeutig den
Beleuchtungsstärken E_1 , E_2 und E_3 der Kamerabilder zugeord-
10 net.

Wenn nun der Ort auf dem Streukörper eindeutig dem Normalenvek-
tor \vec{n} , dieser eindeutig der rückgestreuten Leuchtdichte und diese
wiederum den Beleuchtungsstärken E_1 , E_2 und E_3 , der mit der Ka-
mera aufgenommenen Bilder zugeordnet ist, sind Ort und Beleuch-
15 tungsstärke einander eindeutig zugeordnet. Aus den Beleuchtungs-
stärken in den Bildern ist es demnach möglich, zurückzuverfolgen,
welcher Ort des Streukörpers das Licht gestreut hat. Damit ist es
gelingen, die Streukörperoberfläche eindeutig zu codieren. Mit be-
reits drei Beleuchtungsrichtungen kann jeder Ort der Streukörper-
20 oberfläche im dreidimensionalen Raum unverwechselbar codiert
werden. Diese Codierung besitzt klare Vorteile gegenüber anderen
Verfahren, die beispielsweise den Streukörper abschnittsweise,
Schritt für Schritt beleuchten. Solche Verfahren benötigen eine Viel-
zahl von Beleuchtungsrichtungen, können aber nur eine einzelne
25 Linie auf dem Streukörper erfassen, was einer zweidimensionalen
Erfassung des Objektes entspricht.

Demgegenüber gelingt es beim erfindungsgemäßen Verfahren, mit bereits drei Beleuchtungsrichtungen den Streukörper flächig zu codieren und damit eine dreidimensionale Vermessung des Objektes zu ermöglichen. Aus der eindeutigen Codierung des Ortes und dem
5 Normalenvektor auf dem Streukörper wird nun die Normale $\vec{m}(x, y)$ der Gegenstandsoberfläche ermittelt.

$$\vec{m}(x, y) = (m_x(x, y), m_y(x, y), m_z(x, y))'$$

Im Folgenden wird von einem als Kugel ausgebildeten Streukörper S ausgegangen. Insbesondere besitzt eine Kugelfläche die spezielle
10 Eigenschaft, dass jeder Einheitsvektor $\vec{r}(x, y)$ vom Mittelpunkt in Richtung der Oberfläche (radialer Vektor) parallel zum Normalenvektor $\vec{n}(x, y)$ in diesem Punkt ist (siehe Figur 3). Der radiale Vektor und der Normalenvektor des Gegenstand G sind wiederum über das Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz miteinander verknüpft (Deflek-
15 tometrie). Ist der Gegenstand G klein im Vergleich zum Radius der Kugel, so liegen alle Objektpunkte näherungsweise im Mittelpunkt der Kugel. Auch ohne diese Annahme kann man den Normalenvektor am Gegenstand berechnen, hier soll allerdings ein kleiner Gegenstand angenommen werden, um eine einfache Darstellung zu
20 ermöglichen. Die z-Achse des Koordinatensystems wird so gewählt, dass sie parallel zur optischen Achse der Kamera K verläuft. Entsprechend dem Reflexionsgesetz gilt für den Normalenvektor $\vec{m}(x, y)$ der Oberfläche

$$\vec{m} = \text{const} \cdot (\vec{n} + \vec{b})$$

mit dem Einheitsvektor in Richtung der Beobachtung \vec{b} und der Nebenbedingung, dass \vec{m} und \vec{n} Einheitsvektoren sind. Damit kann man den Normalenvektor des Gegenstand G für eine Vielzahl von Punkten der Gegenstandsoberfläche O bestimmen, hieraus die partiellen Ableitung p und q und aus diesen wiederum die Form der Oberfläche $z(x,y)$ des Gegenstands G durch Integration.

Doch auch ohne die Integration der lokalen Neigung $p(x,y)$ und $q(x,y)$ zur Form $z(x,y)$ lassen sich bereits wertvolle Rückschlüsse über die Gegenstandsoberfläche ziehen. Wider Erwarten ist es sogar sinnvoll, die Auswertung noch vor dem Schritt der Integration abubrechen. Eine grafische, grautoncodierte Darstellung der Neigung (Zwischenergebnis) ist für viele Anwendungen einer grafischen Darstellung von $z(x,y)$ (Endergebnis) sogar vorzuziehen. Dies ist insofern sehr erstaunlich, als ein Endergebnis in aller Regel mehr Aussagekraft hat als ein Zwischenergebnis. Gleiches gilt für eine Darstellung des lokalen Normalenvektors der Gegenstandsoberfläche bzw. seiner Komponenten. Neigung und Normalenvektor sind derartig unmittelbar verknüpft, dass für die folgende Argumentation der Begriff „Neigung“ auch durch den Begriff „Normalenvektor“ oder deren jeweiligen Komponenten ersetzt werden kann.

Die Neigungsdarstellung bietet insbesondere Vorteile, wenn es darum geht, die Form der Oberfläche einem menschlichen Betrachter darzustellen (Visualisierung) und hinsichtlich von Auffälligkeiten zu analysieren (Interpretation, Beurteilung). Die Neigung $p(x,y)$ und $q(x,y)$ werden als grautoncodierte Bilder an einem Monitor, Drucker etc. ausgegeben. Selbst kleinste Beulen, Erhebungen, Riefen, Grate etc. treten in der Neigungsdarstellung hervor.

Diese Vorteile der Neigungsdarstellung sind darin begründet, dass der menschliche Gesichtssinn von Natur aus darin geübt ist, Neigungsdaten zu interpretieren. Beim menschlichen Sehen werden Helligkeitsschattierungen genutzt (wie bei Shape from Shading und dem photometrischen Stereoverfahren), eine räumliche Vorstellung des betrachteten Gegenstands zu schaffen. Daneben gibt es noch andere Mechanismen, wie z. B. das Stereosehen, die ebenfalls zum räumlichen Eindruck beitragen. Im Vergleich zu den anderen Mechanismen des räumlichen Sehens ist das Neigungssehen die genaueste Informationsquelle. So sind geübte Betrachter in der Lage, bei geeigneter Beleuchtung und geeignetem Blickwinkel aus der Schattierung selbst Unregelmäßigkeiten von wenigen 10 Mikrometern zu erkennen. Neben Schattierungen können auch Lichtreflexe an einem Gegenstand beziehungsweise Prüfling (wie bei den deflektometrischen Verfahren) einen räumlichen Eindruck vermitteln, der äußerst feine Details erkennen lässt.

Wird die grautoncodierte Neigungsdarstellung zusammen mit einem neigungsmessenden Verfahren wie dem photometrischen Stereoverfahren oder der photometrischen Deflektometrie eingesetzt, können sogar Unregelmäßigkeiten sichtbar gemacht werden, die das menschliche Auge am realen Gegenstand nicht feststellen kann. Für den Menschen sind Textur (lokale Helligkeit) und Neigungsinformation des Gegenstands immer vermischt. Es ist beispielsweise schwer abzuschätzen, ob eine als dunkel empfundene Linie auf einem Gegenstand von einem Formmerkmal, beispielsweise einen Riss, oder von einer dunkelfarbigen Markierung herrührt. Hier können die photometrische Deflektometrie und das photometrische Stereoverfahren Abhilfe schaffen. Sie berücksichtigen mehr als nur eine Beleuchtungssituation (anders als beim Gesichtssinn) und ermöglichen eine

Trennung von Neigungsdaten und Textur. Als Neigungsbild visualisiert können also unsichtbare Merkmale sichtbar gemacht werden.

5 Auch bei der Genauigkeit bietet die Kombination der Neigungsmessung und Neigungsdarstellung Vorteile. Es können Details im Bereich von wenigen Mikrometern erfasst werden. Die Neigung wird visualisiert, wobei die Schattierungseffekte rechnerisch überhöht und betont werden können.

10 Zudem sind diese neigungsmessenden Verfahren robust gegenüber Verkippung und Verdrehung des Gegenstandes gegenüber der Beleuchtung. Der menschliche Beobachter kann beispielsweise eine flache Delle an einem glänzenden Gegenstand nur unter einer ganz bestimmten Richtung zur Beleuchtung erkennen. Ähnlich ist dies bei vielen Verfahren der Bildverarbeitung. Besonders kritisch ist die Wahl der Beleuchtung bei glänzenden Oberflächen. Treten auch nur
15 kleinste Veränderungen in der Lage der Gegenstandsoberfläche zur Beleuchtung auf, beispielsweise durch Ungenauigkeiten der Zuführung oder durch Abweichungen des Gegenstandes selbst, so verändert sich das Aussehen der Oberfläche grundlegend aufgrund von unterschiedlichen Lichtreflexen. Ganz anders ist dies beim Verfahren
20 der photometrischen Deflektometrie. Selbst am verkippten, glänzenden Gegenstand sind reproduzierbare Messungen und eine objektive Beurteilung möglich. Überdies ist die Neigungsdarstellung vorteilhaft für die maschinelle automatische Beurteilung von Oberflächen. Die als Neigung aufbereiteten Daten erleichtern beziehungsweise
25 ermöglichen erst eine automatische Beurteilung vorzugsweise durch einen Computer oder eine andere elektronische Auswerteeinheit. Die bereits genannten Vorteile der Neigungsdarstellung gelten sinngemäß auch für eine automatische Bewertung.

Aufgrund der vielfältigen Vorteile einer Neigungsdarstellung könnte man sie auch für andere Verfahren, die direkt die Form $z(x,y)$ erfassen, in Betracht ziehen. Die Neigung $p(x,y)$ und $q(x,y)$ könnte dann durch numerische Differentiation gewonnen werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Differentiation insbesondere das hochfrequente Rauschen, das in jeder realen Messung enthalten ist, verstärkt. Bei den neigungsmessenden Verfahren, insbesondere der photometrischen Deflektometrie und dem photometrischen Stereoverfahren ist dies nicht der Fall. Die Neigung wird hier direkt gemessen. Auch hier ist geringfügiges Messrauschen enthalten, es entfällt aber der Schritt einer numerischen Differentiation, der dieses Rauschen verschlimmern könnte.

Eine vorteilhafte Kombination von Messverfahren und Visualisierung ist demnach ein neigungsmessendes Verfahren zusammen mit einer Neigungsdarstellung.

An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass das Verfahren der photometrischen Deflektometrie selbst bei optisch rauen Oberflächen einsetzbar ist. Die Gegenstandsoberfläche liefert ein mehr oder weniger verschwommenes Bild des Streukörpers S . Bei anderen deflektometrischen Verfahren ist dies schädlich, da in der Regel fein strukturierte Muster wie Streifen, Punkte etc. abgebildet werden müssen. Dies ist bei der photometrischen Deflektometrie nicht der Fall. Die Helligkeit auf einem kugelförmigen Streukörper variiert so gleichmäßig, dass auch bei stark verschwommener Abbildung kaum Verfälschungen auftreten.

Damit ist die photometrische Deflektometrie anderen deflektometrischen Verfahren bei rauen und glänzenden Oberflächen überlegen.

Andererseits ist es auch dem photometrischen Stereoverfahren überlegen, das nur für diffus streuende Oberflächen anwendbar ist.

Ein weiterer Vorzug dieses Verfahrens liegt darin, dass bereits drei Kameraaufnahmen (entsprechend drei Beleuchtungsrichtungen) ge-
5 nügen, um die Form des Gegenstands zu ermitteln. Die Zeit für eine vollständige Messung kann daher sehr kurz gehalten werden, wie es in der industriellen Mess- und Prüftechnik gefordert wird. Eine weitere Reduktion auf lediglich eine einzige Kameraaufnahme wird insbesondere erreicht, wenn die drei Lichtquellen in den Farben Rot, Grün
10 und Blau codiert werden und zur Beobachtung eine elektronische Farbkamera K eingesetzt wird. Die Farbkanäle Rot, Grün und Blau enthalten die Bilder 4a, 4b, 4c der entsprechen codierten Beleuchtungsrichtungen. Voraussetzung ist allerdings, dass der Gegenstand einfarbig ist. Die Reduktion einer Messung auf eine einzige Kamera-
15 aufnahme stellt einen entscheidenden Fortschritt dar. Bei entsprechend kurzer Belichtungszeit können, ähnlich einer Blitzlichtaufnahme in der Fotografie, auch bewegte Gegenstände ohne wesentliche Bewegungsunschärfe aufgenommen werden.

Die bisherigen Betrachtungen sind davon ausgegangen, dass glän-
20 zende Gegenstände vermessen werden sollen. Darüber hinaus können das beschriebene Verfahren und die zugehörige Vorrichtung aber auch für diffus streuende Gegenstände gewinnbringend eingesetzt werden. An diesen Oberflächen tritt das Prinzip des photometrischen Stereo nicht erst am Streukörper 1, sondern am Gegenstand
25 selbst in Erscheinung. Der Streukörper 1 zusammen mit den Lichtquellen 1, 2, 3 usw. wirkt wie eine Reihe von ausgedehnten Lichtquellen. Räumlich ausgedehnte Lichtquellen haben den Vorteil, dass sie kohärentes optisches Rauschen, verursacht durch Speckle, mi-

nimieren können. Kohärentes Rauschen schlägt sich bei allen optischen 3D-Sensoren in der Messunsicherheit der Form nieder. Damit ermöglicht das beschriebene Verfahren die Messunsicherheit an diffusen Gegenständen zu reduzieren. Darüber hinaus kommt diese
5 Eigenschaft auch einer präzisen Messung von glänzenden Oberflächen zu Gute.

Besonders vorteilhaft ist vorgesehen, dass die Ergebnisse der Formvermessung als Software-Datei zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht eine einfache Weiterverarbeitung derselben.

10 Außerdem ist es möglich, für die optische Abbildung ein Mikroskop und/oder ein Mikroskopobjektiv zu verwenden. So wird die bestehende Optik der Kamera K derart ersetzt und/oder ergänzt, dass auch die Oberflächen besonders kleiner Gegenstände vermessen werden können.

15 Bevorzugt sind als Lichtquellen auch Luminiszenzdiode (LEDs) einsetzbar. Diese sind günstig herstellbar und können schnell und einfach angesteuert werden.

Schließlich ist es denkbar, zur Beleuchtung eine oder mehrere Blitzlampen zu verwenden. Hierdurch können etwaige Messfehler, insbesondere verursacht durch Relativbewegungen zwischen Lichtquelle,
20 Kamera K und zu vermessendem Gegenstand, die beispielsweise durch Vibrationen oder bewegte Gegenstände hervorgerufen werden können, aufgrund der kurzen Leuchtdauer von Blitzlampen sicher vermieden werden. Außerdem weisen Blitzlampen vorteilhafterweise
25 eine hohe Leuchtkraft auf, so dass die Kamera K entsprechend weniger lichtempfindlich ausgelegt werden kann.

Ansprüche

1. Verfahren zur optischen Formerfassung und/oder Beurteilung von optisch glatten, glänzenden oder optisch rauen Oberflächen, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein photometrisches Stereoverfahren,
5 ein deflektometrisches Verfahren und ein Streukörper (S) so kombiniert werden, dass die Orte auf der Streukörperoberfläche flächig codiert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Streukörper (S) die Form einer Kugel, eines Ellipsoids, eines rotationssymmetrischen Körpers oder Teilen davon aufweist.
10
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ergebnis der Formvermessung und/oder Beurteilung in Form einer Softwaredatei zur Verfügung gestellt wird.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch**
15 **gekennzeichnet**, dass eine elektronisch arbeitende Kamera (K) verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Farbkamera (K) verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch**
20 **gekennzeichnet**, dass die Beleuchtung farblich codiert ist.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass kohärentes Specklerauschen mit Hilfe einer ausgedehnten leuchtenden Streukörperfläche reduziert wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die lokale Neigung und/oder der lokale Normalenvektor der Oberfläche visualisiert und/oder elektronisch beurteilt wird.
- 5 9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Komponente der lokalen Neigung und/oder der lokale Normalenvektor der Oberfläche visualisiert und/oder elektronisch beurteilt wird.
- 10 10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die lokale Neigung und/oder der lokale Normalenvektor als Grauton und/oder Farbton codiert dargestellt wird.
- 15 11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Komponente der lokalen Neigung und/oder des lokalen Normalenvektors als Grauton und/oder Farbton codiert dargestellt wird.
- 20 12. Vorrichtung zur optischen Formvermessung, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, mit zumindest einem optischen Aufnehmer, insbesondere einer Kamera (K), und zumindest einer Lichtquelle (1,2,3), **gekennzeichnet durch einen Streukörper (S)**.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Streukörper (S) zumindest teilweise kugelförmig, ellipsoidförmig und/oder rotationssymmetrisch aufgebaut ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur optischen Abbildung ein Mikroskop und/oder Mikroskopobjektiv verwendet wird.

5 15. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Beleuchtung eine oder mehrere Luminiszenzdioden verwendet werden.

16. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Beleuchtung eine oder mehrere Blitzlampen verwendet werden.

Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur optischen Formerfassung und/oder Beurteilung von optisch glatten, glänzenden oder optisch rauen Oberflächen vorgeschlagen. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass ein
5 photometrisches Stereoverfahren, ein deflektometrisches Verfahren und ein Streukörper (S) so kombiniert werden, dass die Orte auf der Streukörperoberfläche flächig codiert werden.

10 (Figur 3)

1/3

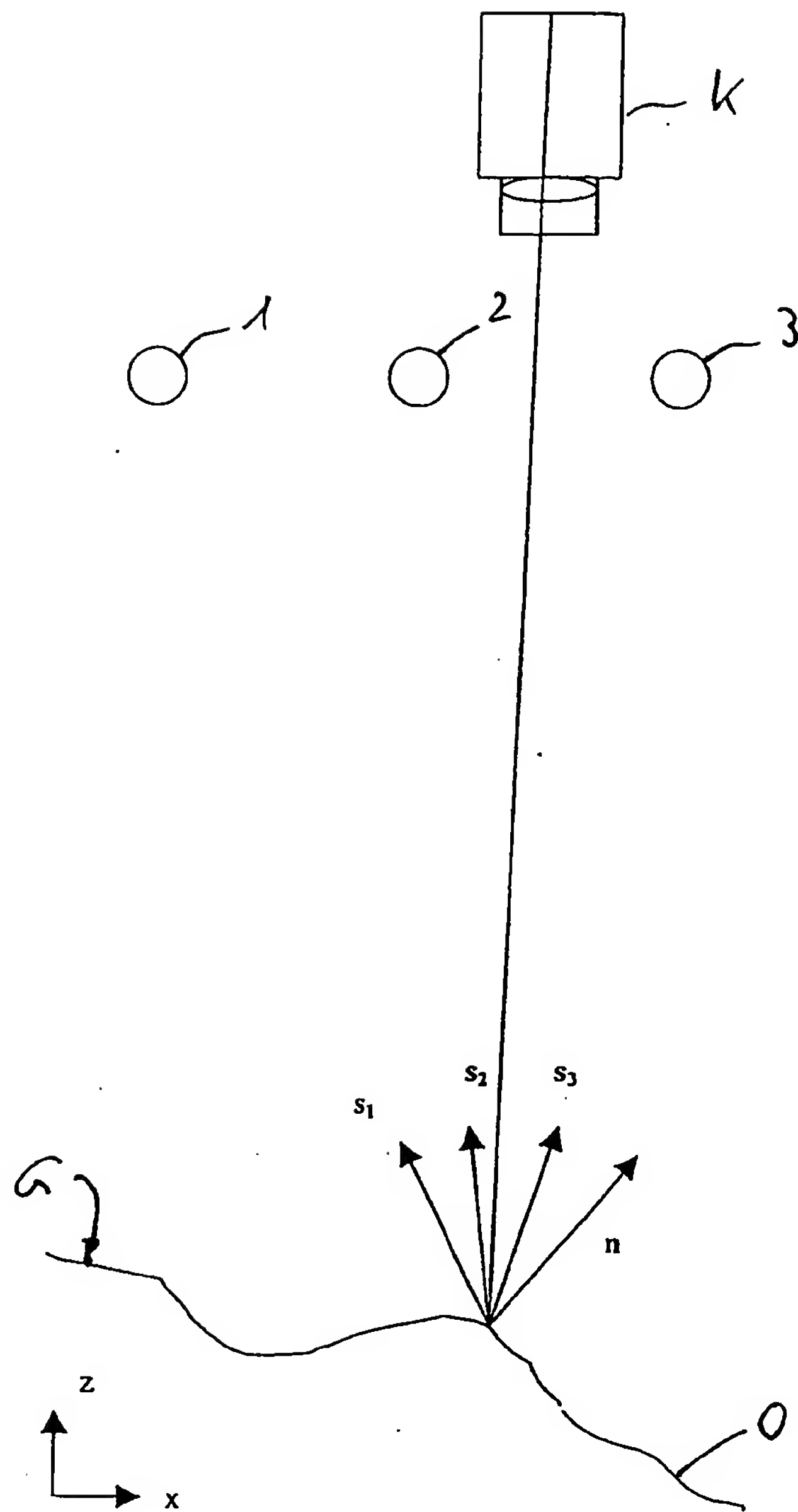


Fig. 1

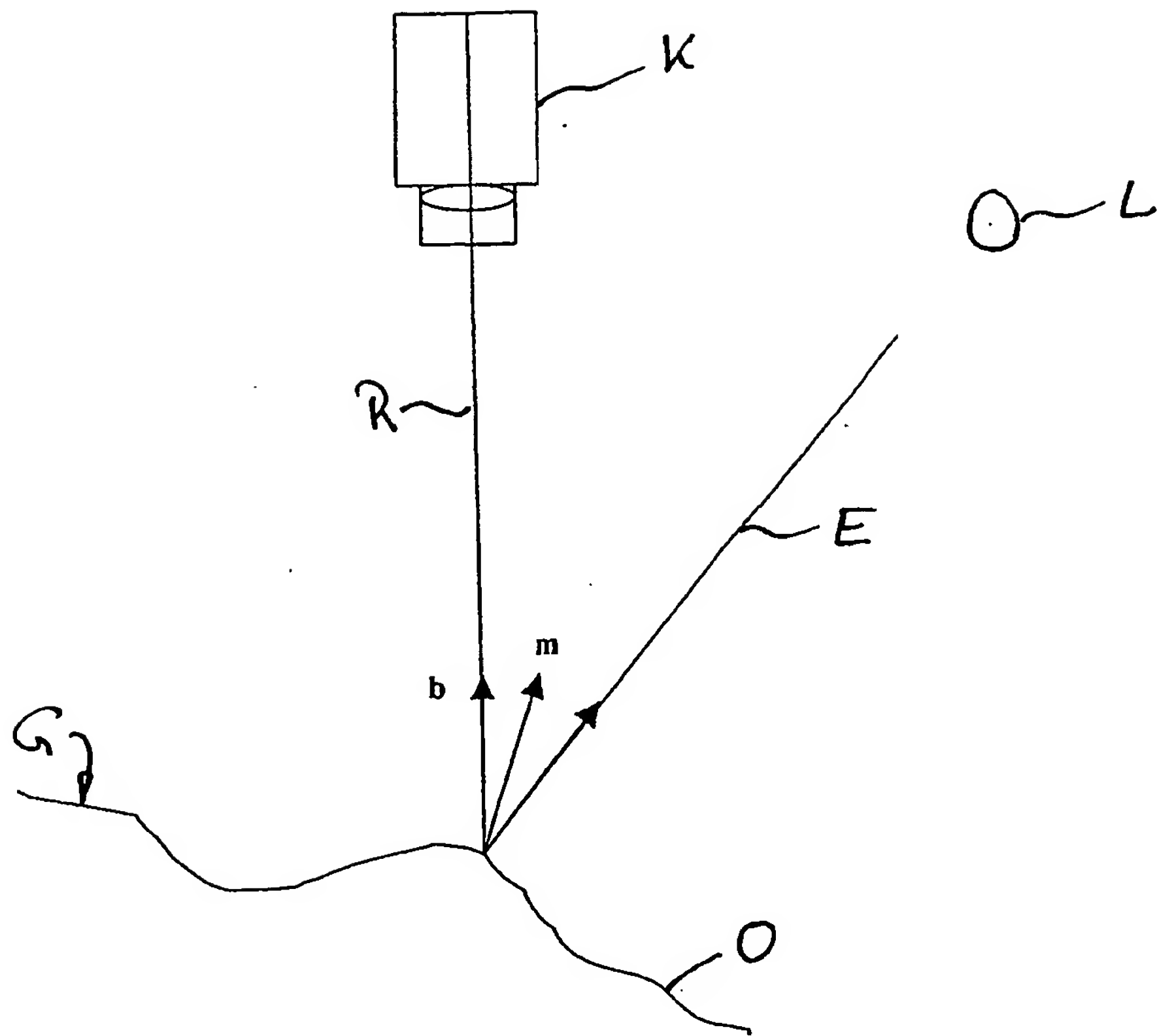


Fig. 2

3/3

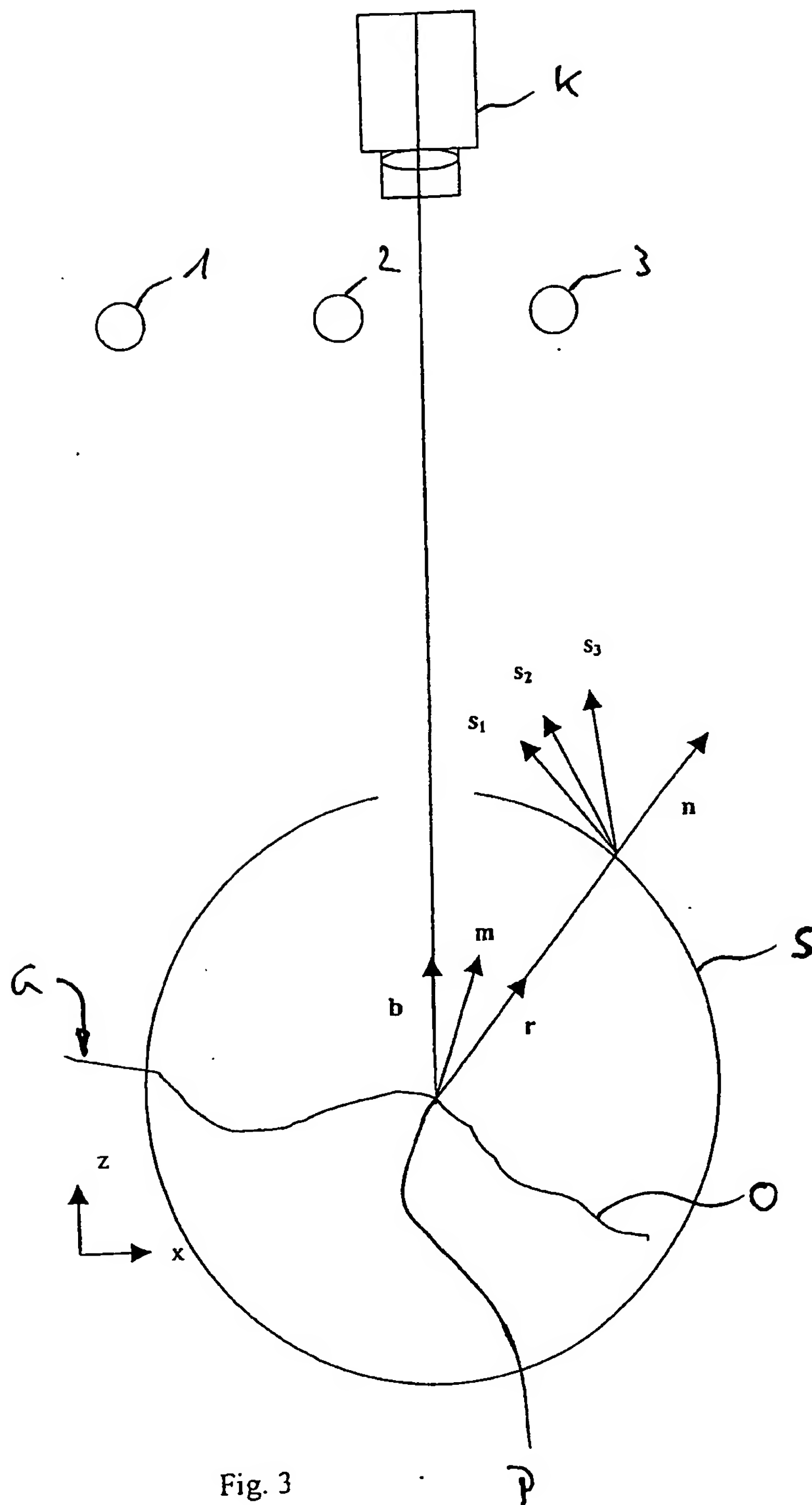


Fig. 3